



Оригинальная статья

Экономическая эффективность использования новых теплоизоляционных материалов в холодных регионах

А. Ф. Галкин¹, М. Н. Железняк¹, А. Ф. Жирков^{✉,1}, В. Ю. Панков², В. И. Балута³

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

³Институт прикладной математики им. В.М. Келдыша РАН, г. Москва, Российская Федерация

✉zhirkov_af@mail.ru

Аннотация

Тепловая защита инженерных сооружений является важной проблемой для современного строительства в криолитозоне. Целью работы являлось получение критерия экономической целесообразности использования новых теплоизоляционных материалов вместо традиционно используемых материалов для тепловой защиты инженерных объектов. Рассмотрено два случая: полной замены одного материала другим и комбинированного использования традиционного и нового теплоизоляционного материалов. В качестве критерия использовано отношение затрат на материалы для достижения нормативного термического сопротивления всей теплоизоляционной конструкции. Получены новые показатели связи между экономическими и теплофизическими характеристиками материалов, в частности, между удельной стоимостью теплоизоляционных материалов (стоимость единицы объема) и их коэффициентом теплопроводности. Для общности анализа введены новые показатели: ценовой симплекс; тепловой симплекс; симплекс термического сопротивления. Установлено, что, с экономической точки зрения, использование новых материалов вместо традиционных будет оправдано в том случае, когда отношение стоимостей нового и традиционного материала не будет превышать обратной величины отношения их коэффициентов теплопроводности (т. е. при условии, что ценовой симплекс будет ниже обратной величины теплового симплекса). Приведены конкретные примеры применения разработанной методики при оценке целесообразности использования тонкоплочных теплоизоляционных материалов вместо минеральной ваты для достижения равного теплозащитного эффекта. Показано, что при существующей стоимости тонкоплочных материалов их использование обойдется в десятки раз дороже традиционной тепловой защиты с помощью минеральной ваты даже при существенном снижении ее термического сопротивления за счет увлажнения в период эксплуатации. Результаты вариантных расчетов позволяют наглядно убедиться в установленной новой закономерности связи экономических и теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов.

Ключевые слова: теплоизоляция, новые материалы, термическое сопротивление, экономическая эффективность, критерий, симплекс, коэффициент теплопроводности

Финансирование. Работы выполнены в рамках бюджетного проекта НИОКТР № 122011800062-5 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика»; расширение подходов и верификация данных осуществлены за счет гранта Российского научного фонда № 23-61-10032 «Разработка методов гибридного интеллекта для решения задач диагностики состояния объектов инфраструктуры в районах Крайнего Севера на базе высокопроизводительных вычислительных систем».

Для цитирования: Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф., Панков В.Ю., Балута В.И. Экономическая эффективность использования новых теплоизоляционных материалов в холодных регионах. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):404–415. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-404-415>

The economic efficiency of using new thermal insulation materials in cold climate

Aleksandr F. Galkin¹, Mikhail N. Zheleznyak¹, Aleksandr F. Zhirkov^{✉1},
Vladimir Y. Pankov², Viktor I. Baluta³

¹Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

³Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉zhirkov_af@mail.ru

Abstract

The aim of this study was to establish criteria for the economic feasibility of using new thermal insulation materials in place of traditionally used materials for the thermal protection of engineering structures. Two scenarios were considered: the complete replacement of one material with another and the combined use of traditional and new thermal insulation materials. The criterion used was the ratio of the cost of materials required to achieve the standard thermal resistance of the entire insulation system. New indicators describing the relationship between the economic and thermophysical properties of materials were developed, particularly relating the specific cost of thermal insulation materials (cost per unit volume) to their thermal conductivity coefficient. To generalize the analysis, novel indicators were introduced: price simplex, thermal simplex, and thermal resistance simplex. We concluded, from an economic perspective, the use of new materials instead of traditional ones is justified if the ratio of the costs of the new and traditional materials does not exceed the reciprocal of the ratio of their thermal conductivity coefficients—that is, if the price simplex is lower than the reciprocal of the thermal simplex. Specific examples demonstrate the application of this methodology in evaluating the feasibility of using thin-film thermal insulation materials instead of mineral wool to achieve equivalent thermal protection. The analysis shows that, at current prices, thin-film materials are tens of times more expensive than traditional mineral wool insulation, even when accounting for a significant reduction in mineral wool's thermal resistance due to moisture during operation. The results of these calculations clearly illustrate the newly established relationship between the economic and thermophysical characteristics of thermal insulation materials.

Keywords: thermal insulation, new materials, thermal resistance, economic efficiency, criterion, simplex, thermal conductivity coefficient

Funding. This study was conducted within the framework of the budgeted project No. 122011800062-5, titled “Thermal field and cryogenic layer of the North-East of Russia: Features of formation and dynamics”. The development of methodologies and data validation were supported by the Russian Science Foundation (grant No. 23-61-10032), titled “Development of hybrid intelligence methods for solving problems of infrastructure assessment in the Far North based on high-performance computing systems”.

For citation: Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F., Pankov V.Yu., Baluta V.I. The economic efficiency of using new thermal insulation materials in cold climate. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):404–415. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-404-415>

Введение

Тепловая защита инженерных объектов в криолитозоне, занимающей почти 70 % территории нашей страны (включая зону островной мерзлоты), является перманентной проблемой, на решение которой уже многие десятилетия направлены усилия научного и инженерного сообщества. Это вызвано как требованиями экономии энергетических ресурсов и их высокой стоимостью, так и необходимостью обеспечения нормативных

температурных условий эксплуатации технических объектов в различных областях хозяйственной деятельности человека. Например, в горной промышленности теплоизоляционные материалы используются для предотвращения как глубокого промерзания пород при открытой разработке месторождений полезных ископаемых, так и оттаивания пород вокруг выработок при ведении подземных горных работ [1–6]. В транспортной индустрии теплоизоляция используется для обес-

печения надежной и безопасной эксплуатации линейных инженерных сооружений, например, железных и автомобильных дорог, кабелей связи [7–11]. В жилищном и гражданском строительстве теплоизоляция играет важную роль в обеспечении нормативных параметров микроклимата в зданиях и сооружениях, а также снижении затрат на доставку теплоносителей к объектам с помощью наземных и подземных теплопроводов (теплотрасс) [12–14]. Для обеспечения надежной тепловой защиты применяют как природные, так и специально созданные теплоизоляционные материалы, отличительными чертами которых являются низкий коэффициент теплопроводности и небольшая плотность, что позволяет при их использовании добиться нормативного термического сопротивления при минимуме материальных затрат [15–21]. При этом многие традиционно используемые материалы обладают существенным недостатком – изменением своих теплофизических свойств в период эксплуатации, в частности, значительным снижением коэффициента теплопроводности при увлажнении [22–24]. Это требует устройства специальных дополнительных гидроизоляционных покрытий, что приводит иногда к кратному удорожанию теплозащитных конструкций, хотя сами теплоизоляционные материалы, как правило, стоят недорого. В последние десятилетия в нашей стране и за рубежом получили распространение новые теплоизоляционные материалы – тонкопленочные теплоизоляционные покрытия (ТПП), к которым среди научного и инженерного сообщества нет однозначного отношения. Одни исследователи активно их пропагандируют [25–28], другие считают это прямым обманом потребителей [29, 30]. Анализ показывает, что в основном это связано с агрессивной, а зачастую просто с недобросовестной рекламной кампанией «эффективных» рекламных менеджеров. Пресловутый рекламный слоган «Один миллиметр нашей теплоизоляции заменяет пять сантиметров стекловаты» ничего, кроме улыбки у специалистов вызвать не может. К сожалению, хозяйственные работники и управляющий персонал многих строительных и теплоснабжающих организаций не обладают достаточными компетенциями в области теплотехники и строительной теплофизики и принимают необоснованные решения о замене традиционно используемых теплоизоляционных материалов «новыми, перспективными, созданными на основе космических нанотехнологий»

материалами (рекламная цитата одного из многих сайтов производителей «теплоизоляционной краски»). В данной работе мы не будем опираться на рекламные трюки, а основываться на результатах конкретных научных исследований по изучению теплофизических свойств ТПП, которые в реальности мало чем отличаются от традиционных теплоизоляционных материалов [31, 32]. В основном, спор вокруг использования новых теплоизоляционных материалов между производителями и специалистами сводится к теплофизическим характеристикам ТПП и возможности обеспечить с их помощью нормативное термическое сопротивление объекта или заданную степень снижения теплового потока. Экономическая оценка использования новых материалов взамен традиционных не приводится. Хотя известно, что внедрение всего нового (если это не связано с безопасностью жизнедеятельности человека) должно быть экономически целесообразно на данном этапе развития общества. Основной задачей настоящей работы являлась разработка доступного и понятного широкому кругу хозяйственных работников и управленческого персонала, принимающих решения, укрупненного метода оценки экономической целесообразности использования новых теплоизоляционных материалов вообще и ТПП в частности вместо традиционных теплоизоляционных материалов, в том числе в случаях комбинированного использования традиционных и новых материалов в одной теплозащитной конструкции.

Учитывая вышесказанное, целью настоящих исследований являлась разработка простого инженерного критерия укрупненной оценки экономической целесообразности замены традиционных теплоизоляционных материалов новыми теплоизоляционными материалами.

Методы

В первом приближении будем считать, что экономическая целесообразность определяется по денежным затратам на материалы для достижения заданного нормативного термического сопротивления. То есть все остальные затраты, как то: доставка, нанесение, эксплуатационные расходы и т. п., для базового (традиционного) материала и нового материала идентичны. И оцениваются дополнительно в том случае, если затраты на материалы в обоих случаях приблизительно равны. Для общности рассуждений и выводов будем использовать в качестве крите-

рия следующую безразмерную (относительную) величину: отношение удельной стоимости нового материала (на 1 м² поверхности) к удельной стоимости базового материала. Термическое сопротивление покрытия должно быть одинаково в обоих случаях. (Необходимо также учесть снижение термического сопротивления базового материала при увлажнении.) В работах [33, 34] нами было показано, что при оценке вариантов удобно использовать удельную величину термического сопротивления $R_T = 1 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$. Затраты на материал на 1 м² поверхности (S_M) с термическим сопротивлением $R_M = \delta_M / \lambda_M$ равны

$$Z_M = C_M \cdot S_M \cdot \delta_M = C_M \cdot \delta_M. \quad (1)$$

Здесь Z_M – удельные затраты на материалы на единицу площади теплоизолируемой поверхности, руб.; C_M – стоимость 1 м³ материала, руб./м³; λ_M – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

Эксплуатационные затраты и затраты на нанесение материала не учитываем. Параметр δ_M находим из условия $R_M \geq R_0$. Здесь R_0 – нормативное термическое сопротивление, м²·К/Вт. Если ввести условную единицу термического сопротивления $R_T = 1 = \delta / \lambda$, то

$$\delta = R_T \lambda. \quad (2)$$

Тогда из (1) получим

$$Z_M(1) = C_M \cdot S_M = C_M \cdot R_T \cdot \delta, \quad (3)$$

где $Z_M(1)$ – стоимость материала, которая обеспечивает достижение одной условной единицы термического сопротивления на единицу площади теплоизолируемого объекта, руб./м³.

Такой показатель удобен при сравнении различных материалов для достижения одинакового термического сопротивления на единице площади объекта. Если известно нормативное термическое сопротивление на конкретном объекте, то удельный объем затрат надо умножить на величину термического сопротивления:

$$Z_0 = Z_M(1) R_0. \quad (4)$$

Рассмотрим пример. Стоимость материала составляет 100 рублей на кубический метр. Теплопроводность равна 0,05 Вт/(м·К). Нормативное термическое сопротивление

$$R_0 = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0,2}{0,05} = 4,0 \text{ (м}^2 \cdot \text{К/Вт)}.$$

Подсчитаем удельные затраты на 1 м² площади с использованием базового материала: $Z_0 = 100 \cdot 1 \cdot 0,2 = 20,0$ руб. Теперь выполним

аналогичные расчеты с использованием понятия «единица термического сопротивления»:

$$\begin{aligned} Z_M(1) &= C_M \cdot \lambda \cdot \{R = 1; S = 1\} = \\ &= 100 \cdot 0,05 = 5,0 \text{ руб./ (м}^2 \cdot \text{К/Вт)} \text{ на } 1 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Затраты на достижение нормативного термического сопротивления будут равны $Z_0 = Z_M(1) \cdot R_0 = 5 \cdot 4,0 = 20,0$ рублей на 1 м² площади теплоизолируемой поверхности. То есть получим идентичные цифры.

Для удобства сравнения двух материалов по экономическому критерию (показателю) введем безразмерный показатель эффективности

$$\beta = \frac{C_M \lambda_M}{C_\delta \lambda_\delta} = \overline{C}_M \overline{\lambda}_M; \quad \overline{\lambda}_M = \frac{\lambda_M}{\lambda_\delta}; \quad \overline{C}_M = \frac{C_M}{C_\delta}. \quad (5)$$

Здесь использованы два новых параметра (более правильно, «параметрических критерия»), которые называются симплексами: $\overline{\lambda}_M$ и $\overline{C}_M$. Первый представляет собой отношение коэффициентов теплопроводности нового и базового материалов, а второй отношение их удельных стоимостей. Далее симплекс $\overline{\lambda}_M$ будем называть «тепловой симплекс», а симплекс $\overline{C}_M$ – «ценовой симплекс».

Критерий экономической эффективности представляет собой произведение двух параметрических критериев (симплексов). Если $\beta < 1$, то применение нового материала вместо традиционного (базового) материала экономически целесообразно. И можно проводить детальную экономическую оценку внедрения нового материала, с учетом всех остальных статей затрат.

Рассмотрим вариант, когда новый материал используется совместно с базовым материалом. В этом случае расчетные формулы преобразуются к виду

$$Z_M = Z_1 + Z_2 = C_1 \lambda_1 + C_2 \lambda_2, \quad (6)$$

$$Z_0 = C_1 \lambda_1 R_1 + C_2 \lambda_2 R_2, \quad (7)$$

$$R_0 = R_1 + R_2, \quad (8)$$

$$\beta = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1} = 1 + \overline{C}_M \overline{\lambda}_M. \quad (9)$$

То есть всегда получаем $\beta > 1$. Подходя формально, из выражения (9) можно сделать неправильный вывод, что комплексное использование нового и базового материала всегда экономически не эффективно. В действительности это не так. Формула (9) означает, что при использовании слоистой структуры тепловой защиты из разных материалов, экономическую эффективность использования всей теплозащитной конструкции

необходимо оценивать по каждому слою отдельно. То есть формула (9) преобразуется в формулу (5) для нового материала с термическим сопротивлением, определенным по следующей формуле:

$$R_m = \Sigma R_0 - R_1 = \Sigma R_0 - (\delta_1/\lambda_1), \quad (10)$$

где ΣR_0 – расчетное нормативное термическое сопротивление всей конструкции, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

При выводе формулы (9) мы считали, что затраты на базовый материал при использовании в комплексе с новым материалом остаются постоянными. Это придает определенную надежность результатам расчетов по формуле (9). В действительности, поскольку нормативное термическое сопротивление остается неизменным, затраты на базовый материал должны уменьшаться, так как часть базового материала заменяется новым материалом. В этом случае более корректным будет следующая запись исходных формул:

$$\beta = \frac{3_1(R_1) + 3_2(R_2)}{3_1(R_0)} = (C_1\lambda_1R_1 + C_2\lambda_2R_2)/(C_1\lambda_1R_0). \quad (11)$$

Толщины отдельных слоев определяются из выражений

$$\delta_1 = (R_1\lambda_1); \quad \delta_2 = (R_2\lambda_2); \quad \delta_0 = (R_0\lambda_1). \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), с учетом выражения (8) получим следующее выражение для определения критерия эффективности при комплексном использовании нового и базового материалов в конструктивном теплоизоляционном слое:

$$\beta = 1 + \tilde{R}(\tilde{f} - 1), \quad (13)$$

где $\tilde{R} = R_2/R_0$; $\tilde{f} = \tilde{\lambda}\tilde{C}$; $\tilde{C} = C_2/C_1$; $\tilde{\lambda} = \lambda_2/\lambda_1$.

При выводе формулы (13) появился новый параметрический критерий – симплекс «термического сопротивления», который характеризует долевое участие нового материала в общем термическом сопротивлении комбинированной теплозащитной конструкции.

Анализ выражений (13) показывает, что параметр будет меньше единицы только в том случае, если выполняется условие $\tilde{f} < 1,0$. То есть между стоимостными и теплофизическими характеристиками материалов должно существовать отношение, определяющее эффективность комплексного использования материалов:

$$(C_2/C_1) < (\lambda_1/\lambda_2) \text{ или } C_2 < C_1 \cdot (\lambda_1/\lambda_2). \quad (14)$$

Если условие (14) выполняется, то использовать комплексную теплоизоляционную конструкцию экономически целесообразно. В про-

тивном случае нет. Формула (13) является более общим случаем формулы (5). Действительно, если у нас однослойная конструкция, то $\tilde{R} = 1$. Соответственно из (13) получим $\beta = f = \tilde{\lambda}\tilde{C}$. Данное выражение эквивалентно формуле (5). В общем случае, основываясь на выражениях (5) и (14), можно сформулировать следующую количественную закономерность целесообразности использования новых теплоизоляционных материалов (как в комплексе, так и отдельно): «Использование нового материала экономически целесообразно, если значение ценового симплекса меньше обратной величины теплового симплекса».

Допустим, что в процессе эксплуатации базовый материал, в отличие от нового, может увлажняться и изменять свое термическое сопротивление. В расчетах необходимо учитывать и этот вариант. В сухом состоянии материал состоит из основы (связующего) и пор, заполненных воздухом. При заполнении части порового пространства водой, теплопроводность которой в 25 раз больше воздуха, коэффициент теплопроводности материала существенно увеличивается. Если теплоизоляционный материал эксплуатируется не только при положительной, но и отрицательной температуре наружного воздуха (например, поверхностные теплотрассы на Севере), то изменение коэффициента теплопроводности при увлажнении будет еще больше (теплопроводность льда почти в 4 раза больше воды и почти в 100 раз больше воздуха). То есть при увлажнении термическое сопротивление является функцией влажности (льдистости) материала. В этом случае $R_0 = f(w)$, где w – влажность (льдистость) материала, которая изменяется в пределах от $0 \leq w \leq m$. Показатель m характеризует открытую пористость материала. По физическому смыслу увлажнение происходит путем заполнения пор влагой. Нижний предел соответствует «абсолютно сухому» материалу, а верхний предел – полностью увлажненному, когда все поры заполнены водой (льдом). В дальнейших расчетах принято, что усадки материала при увлажнении не происходит. Для расчета коэффициента теплопроводности увлажненного теплоизоляционного материала используем формулу К. Лихтенеккера [35, 36] для трехкомпонентной среды

$$\lambda(w) = (\lambda_w^w)(\lambda_w^{1-m})(\lambda_a^{m-w}). \quad (15)$$

Для полностью насыщенного влагой материала ($w = m$) формула (15) преобразуется к виду

$$\lambda(w) = (\lambda_w^m)(\lambda_s^{1-m}). \quad (16)$$

Для полностью сухого материала ($w = 0$) формула (15) примет вид

$$\lambda(w) = (\lambda_a^m)(\lambda_s^{1-m}). \quad (17)$$

Представляет практический интерес степень изменения коэффициента теплопроводности материала при увлажнении, которую можно определить по формуле

$$q = (\lambda_w^w)(\lambda_s^{1-w})/(\lambda_a^m)(\lambda_s^{1-m}) = (\lambda_w/\lambda_a)^w. \quad (18)$$

Соответственно, параметр $\tilde{\lambda}$ в формулах (5) и (13) будет определяться по формуле

$$\tilde{\lambda} = \lambda_2/(\lambda_1 q). \quad (19)$$

Результаты и обсуждение

По полученным формулам были приведены варианты расчеты, которые представлены в виде графиков на рисунках 1–5. На рис. 1 представлены графики, отражающие рост коэффициента теплопроводности материала с определенной пористостью в зависимости от степени заполнения пор влагой.

Наглядно прослеживается следующая очевидная закономерность: чем больше влажность, тем больше коэффициент теплопроводности материала. Не совсем очевидной закономерностью является факт увеличения коэффициента тепло-

проводности материала при постоянной влажности при уменьшении пористости. Причем, чем ниже пористость материала, тем зависимость (рост) коэффициента теплопроводности от влажности сильнее выражена. (Сравним, например, кривые 1 и 3 при влажности 0,3 и 0,6.)

На рис. 2 представлены результаты расчета степени изменения коэффициента теплопроводности пористого материала в зависимости от влажности в летний и зимний периоды года.

Характер графиков наглядно показывает, что агрегатное состояние влаги в порах существенно влияет на степень изменения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала. При этом в зимний период года, когда влага превращается в лед, степень изменения коэффициента теплопроводности резко увеличивается (соответственно, увеличивается и степень уменьшения термического сопротивления материала) при росте начальной влажности. Соответствующие области (при изменении начальной влажности с 0,2–0,3 до 0,5–0,6) выделены зеленым и голубым цветом. Видно, что площадь фигуры голубого цвета намного больше площади фигуры зеленого цвета. На рис. 3 представлены обобщающие 3D графики, подтверждающие необходимость не только учета степени увлажнения теплоизоляционного материала при эксплуата-

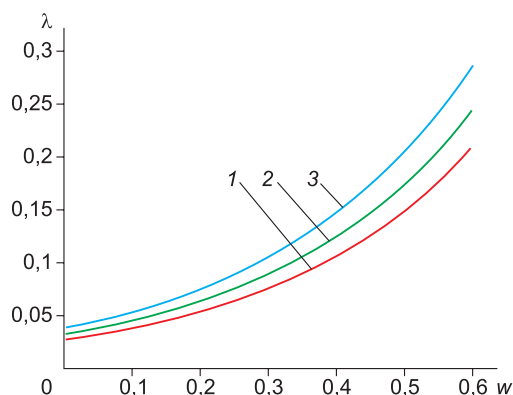


Рис. 1. Изменение коэффициента теплопроводности λ теплоизоляционного пористого материала при увлажнении (w – доля заполнения пор водой): 1 – пористость 0,8; 2 – пористость 0,7; 3 – пористость 0,6

Fig. 1. Variation in the thermal conductivity coefficient λ of a porous thermal insulation material when moistened (w – proportion of pores filled with water): 1 – porosity 0.8; 2 – porosity 0.7; 3 – porosity 0.6

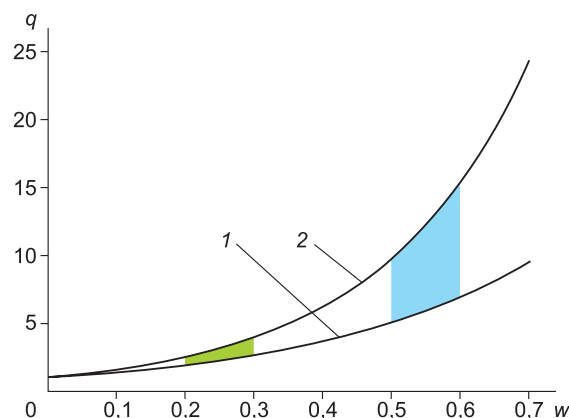


Рис. 2. Степень изменения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного пористого материала при увлажнении (w – доля заполнения пор водой или льдом): 1 – в летний период (при положительной температуре воздуха $T > 0^\circ\text{C}$); 2 – в зимний период (при отрицательной температуре воздуха $T \leq 0^\circ\text{C}$)

Fig. 2. Degree of variation in the thermal conductivity coefficient of porous thermal insulation material when moistened (w – proportion of pores filled with water or ice): 1 – in summer (at positive air temperatures $T > 0^\circ\text{C}$); 2 – in winter (at negative air temperatures $T \leq 0^\circ\text{C}$)

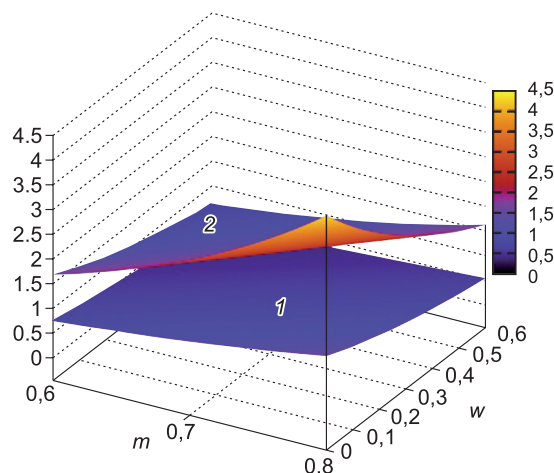


Рис. 3. Изменение коэффициента теплопроводности теплоизоляционного пористого материала при увлажнении (w – доля заполнения пор водой) в зависимости от пористости: 1 – в летний период; 2 – в зимний период

Fig. 3. Variation in the thermal conductivity coefficient of porous thermal insulation material when moistened (w – proportion of pores filled with water) depending on porosity: 1 – summer; 2 – winter

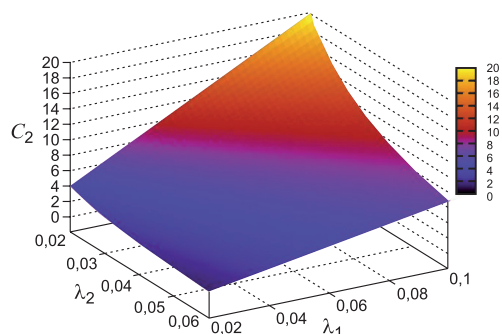


Рис. 5. Допустимая стоимость одного кубического метра (тыс. рублей) нового теплоизоляционного материала при стоимости базового материала 4,0 тыс. рублей в зависимости от значения их коэффициентов теплопроводности

Fig. 5. Acceptable cost per cubic metre (thousand roubles) of new thermal insulation material at a base material cost of 4.0 thousand roubles, depending on their thermal conductivity coefficients

ции, но и раздельной оценки влияния теплового симплекса на эффективность использования новых материалов в зимний и летний периоды.

Причем, если при оценке критерия эффективности β в летний период значение его близко к единице, то необходимо дополнительно провести оценку при зимнем тепловом симплексе. На рис. 4 представлен 3D график изменения показателя эффективности β в зависимости от стоимостного критерия f при различной степени

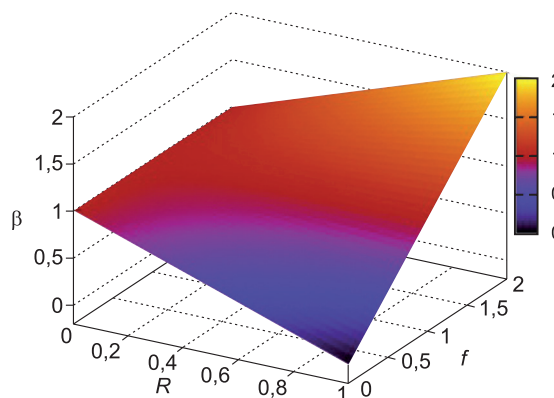


Рис. 4. Изменение показателя эффективности β в зависимости от стоимостного критерия f при различной степени замены (R) традиционного материала новым в комбинированной конструкции тепловой защиты

Fig. 4. Variation in the efficiency indicator β depending on the cost criterion f at different degrees of replacement (R) of traditional material with new material in a combined thermal protection structure

замены (R) традиционного материала новым в комбинированной конструкции тепловой защиты

Анализ цветовой дифференциации плоскости на рисунке показывает, что размер области, где значения коэффициента эффективности меньше единицы, зависит, главным образом, от значения параметра f , что, собственно, и было установлено нами ранее при анализе формулы (13). Данный график наглядно подтверждает сделанный вывод о том, что для экономической целесообразности комплексного использования двух материалов в одной конструкции достаточным условием является выполнения неравенства $f \leq 1$. Причем степень замены (долевое участие нового материала в общем термическом сопротивлении теплозащитной конструкции) никакой роли не играет.

На рис. 5 представлены результаты вариантов расчетов по формуле (14), которая связывает тепловые и ценовые характеристики двух материалов. В данном случае по оси Z представлены значения удельной стоимости нового материала, при которой его использование вместо традиционного теплоизоляционного материала (принята усредненная стоимость теплоизоляционных материалов, равная 4,0 тыс. руб. за 1 m^3) будет экономически целесообразно.

Как видно из графика, допустимая стоимость нового материала, в большинстве случаев, не

должна превышать 10–12-кратного значения стоимости базового материала. С одной стороны, эти цифры обнадеживают и открывают перспективу для внедрения новых материалов с низким коэффициентом теплопроводности. Но, с другой стороны, сложившиеся на рынке цены, например для материалов ТТП (200–500 тыс. руб. за 1 м³), показывают, что в реальном диапазоне изменения коэффициента теплопроводности (минус второй порядок) они неконкурентоспособные. Видимо поэтому им производители «назначают» нереальные (минус третий порядок) значения коэффициента теплопроводности. На рис. 6 представлен 3D график, характеризующий изменение допустимой стоимости (C_2) одного кубического метра (тыс. рублей) нового теплоизоляционного материала в зависимости от стоимости (C_1) базового материала (тыс. рублей) и отношения их коэффициентов теплопроводности (теплового симплекса).

Как видно из графика, экономически обоснованная цена нового материала при реальном диапазоне изменений теплового симплекса не должна превышать 16-кратного значения цены базового материала. Это в несколько раз меньше существующих рыночных значений ценового симплекса, который, например, для ТТП изменяется в диапазоне 50–100 и выше.

На рис. 7 представлен график для определения допустимого значения коэффициента теплопроводности нового теплоизоляционного материала в зависимости от значения ценового симплекса при различных значениях коэффициента теплопроводности базового материала.

Данный график позволяет разработчикам теплоизоляционных материалов сформировать теплофизические требования к конкретным новым материалам для замены существующих, исходя из ожидаемых значений ценового симплекса. А также, наоборот, определить предельную цену нового материала с ожидаемым коэффициентом теплопроводности, при которой использование нового материала будет экономически оправдано. Например, если мы создаем новый материал с коэффициентом теплопроводности, равным 0,12 Вт/(м·К) (первая красная линия на рисунке), то его конкурентоспособная удельная стоимость должна быть в 2 раза ниже цены базового материала, с коэффициентом теплопроводности, равным 0,06 Вт/(м·К). Если создается материал с улучшенным, по отношению к базовому мате-

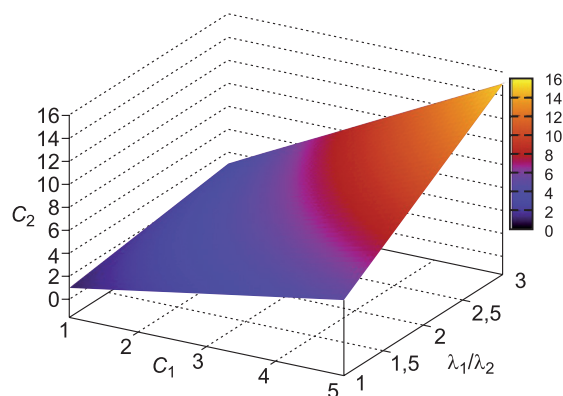


Рис. 6. Допустимая стоимость (C_2) одного кубического метра (тыс. рублей) нового теплоизоляционного материала в зависимости от стоимости (C_1) базового материала (тыс. рублей) и отношения их коэффициентов теплопроводности

Fig. 6. Acceptable cost (C_2) per cubic metre (thousand roubles) of new thermal insulation material depending on the cost (C_1) of the base material (thousand roubles) and the ratio of their thermal conductivity coefficients

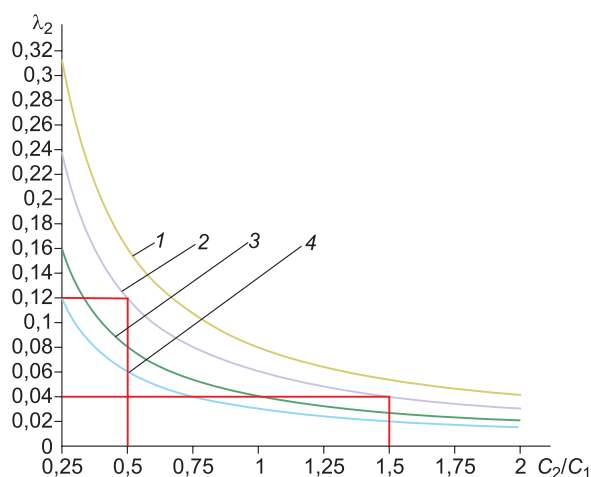


Рис. 7. Допустимое значение коэффициента теплопроводности нового теплоизоляционного материала в зависимости от значения ценового симплекса (C_2/C_1) при различных значениях коэффициента теплопроводности базового материала: 1 – 0,08 Вт/(м·К); 2 – 0,06 Вт/(м·К); 3 – 0,04 Вт/(м·К); 4 – 0,03 Вт/(м·К)

Fig. 7. Acceptable value of the thermal conductivity coefficient of the new thermal insulation material depending on the price simplex value (C_2/C_1) at different values of the thermal conductivity coefficient of the base material: 1 – 0.08 W/(m·K); 2 – 0.06 W/(m·K); 3 – 0.04 W/(m·K); 4 – 0.03 W/(m·K)

риалу, значением коэффициента теплопроводности, например, 0,04 Вт/(м·К) (вторая красная линия на рисунке), то его стоимость может быть увеличена в 1,5 раза. В целом же график наглядно подтверждает выведенную ранее закономерность для экономически эффективного нового

материала: «Ценовой симплекс нового материала должен быть ниже обратной величины его теплового симплекса».

Заключение

Разработана инженерная методика оценки экономической эффективности использования новых теплоизоляционных материалов в промышленности для тепловой защиты объектов различного назначения. Отличительной чертой методики является учет изменения коэффициента теплопроводности материала при увлажнении, а также совместное использование базового и нового материалов в одной теплозащитной конструкции. Основным выводом проделанной работы можно считать получение новой закономерности, определяющей экономическую эффективность использования новых теплоизоляционных материалов в строительной индустрии: стоимость нового материала должна быть не больше стоимости базового материала во столько раз, во сколько раз коэффициент теплопроводности нового материала меньше коэффициента теплопроводности базового материала. Закономерность является общей, как при полной замене одного материала другим, так и при комбинированном использовании базового и нового материалов. Это позволяет как разработать требования к созданию новых теплоизоляционных материалов, так и рационально выбирать теплоизоляционные материалы при проектировании и строительстве конкретных инженерных объектов. Дальнейшие исследования в данной области целесообразно направить на расширение расчетной модели путем учета затрат на нанесение и доставку материалов, а также учет эксплуатационных затрат. Статья имеет научное, практическое и методическое значение и может быть полезна специалистам в области разработки и использования новых теплоизоляционных материалов, студентам и аспирантам, обучающимся по направлению «Строительная физика».

Список литературы / References

1. Ковлеков И.И., Дмитриев А.А. Обоснование и расчет теплоизоляции для подготовки вскрышных пород к выемке при разработке россыпного месторождения золота. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013;(8):368–372.
2. Дугарцыренов А.В., Бельченко Е.Л. Параметры теплоизоляции при промерзании грунтов на допустимую глубину. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009;(6):44–47.
3. Дугарцыренов А.В., Бельченко Е.Л. О теплоизоляции складов-отвалов при разработке россыпных месторождений. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009;(2):129–133.
4. Galkin A.F. Calculation of parameters of cryolithic zone mine openings thermal protection coating. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;(8):64–69.
5. Галкин А.Ф., Наумов А.А. Исследование области эффективного использования легких бетонов в подземных рудниках Севера в криолитозоне. *Горный журнал*. 2014;(4):99–101.
6. Галкин А.Ф. Эффективность применения теплоизоляции в подземных сооружениях криолитозоны. *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2021;(4):18–21. <https://doi.org/10.18635/2071-2219-2021-4-18-21>
7. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю. и др. Анализ конструктивных решений в зависимости от типа изоляционных материалов в дорожных покрытиях в многолетнемерзлых грунтах. *Транспортное строительство*. 2022;(1):14–17.
8. Бессонов И.В., Боброва Е.Ю., Агафонова Н.З. и др. Проектные решения и моделирование температурных полей в системах теплоизоляции в основаниях автомобильных дорог в многолетнемерзлых грунтах. *Транспортное строительство*. 2022;(3):32–34.
9. Ильячев В.А., Никифорова Н.С., Коннов А.В. Перспективы использования изделий из пеностекла в основании зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах. *Жилищное строительство*. 2024;(9):36–41. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-9-36-41>
10. Ильячев В.А., Никифорова Н.С., Коннов А.В. Prospects for the use of foam glass products in the foundation of buildings and structures on long term frozen soils. *Housing Construction*. 2024;9:36–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-9-36-41>
11. Ярцев В.П., Иванов Д.В., Андрианов К.А. Прогнозирование долговечности экструзионного пенополистиро-

ла в дорожных конструкциях. *Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура*. 2010;19(3):99–104.

Yartsev V.P., Ivanov D.V., Andrianov K.A. Forecasting durability of extruded foam polystyrene in road structures. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2010;19(3):99–104. (In Russ.)

11. Галкин А.Ф., Курта И.В., Панков В.Ю. Использование горелых пород при подземной прокладке кабельных линий связи в криолитозоне. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(12):131–137. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2946>

Galkin A.F., Kurta I.V., Pankov V.Yu. Use of burned rocks in underground laying of cable lines in the cryolitzone. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(12):131–137. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2946>

12. Данилова Н.И. Современные методы утепления фасадов зданий и влияние теплоизоляции наружных стен на энергосбережение зданий. *Вестник науки*. 2023;4(12):1441–1447. Режим доступа: <https://www.vestnik-nauki.rf/article/12044> (дата обращения: 31.07.2025 г.)

Danilova N.I. Modern methods of insulation of building facades and the influence of thermal insulation of external walls on the energy saving of a building. *Vestnik nauki*. 2023;4(12):1441–1447. Available at: <https://www.vestnik-nauki.rf/article/12044> (accessed: 07/31/2025)

13. Андреев М.К., Гамаюнова О.С. Утепление фасадов при реновации жилых зданий типовых серий. *Инженерные исследования*. 2023;12(2):19–26.

Andreev M.K., Gamayunova O.S. Facade insulation during renovation of residential buildings of standard series. *Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]*. 2023;12(2):19–26. (In Russ.)

14. Логинова Н.А., Прищепов А.Ф. Характеристики применяемых и перспективных теплоизоляционных материалов и покрытий для систем теплоснабжения. *Энергосбережение и водоподготовка*. 2012;80(6):20–21.

Loginova N.A., Prishchepov A.F. Characteristics of applied and prospective thermal insulation materials and coatings for heat supply systems. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2012;80(6):20–21. (In Russ.)

15. Буланович В.Ф. Новая технология энергосберегающей гидротеплоизоляции трубопроводов. *Практика противокоррозионной защиты*. 2021;26(4):42–44. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2021.102.4-4>

Bulanovic V.F. New technology of energy-saving hydrothermal insulation of pipelines. *Theory and Practice of Corrosion Protection*. 2021;26(4):42–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2021.102.4-4>

16. Макачук Г.В., Саркисов С.В., Мележик А.О. К вопросу о выборе современных теплоизоляционных материалов. В кн.: Коновалов В.Б. (ред.) *Актуальные научные проблемы военных исследований: Сборник научных трудов*. СПб.: Изд-во Политехнического университета; 2019. С. 336–343.

Makarchuk G.V., Sarkisov S.V., Melezhik A.O. On the choice of modern thermal insulation materials. In: Konovalov V.B. (ed.) *Actual scientific problems of military research: Collection of scientific papers*. St. Petersburg: Polytechnic University Publishing House; 2019, pp. 336–343. (In Russ.)

17. Бегич Я.Э., Турнаев Е.Е., Еникеев А.И. Эксплуатационные свойства штукатурных фасадов с теплоизоляционным слоем из минеральной ваты и экструзионного пенополистирола. В кн.: Беляев Н.Д. (ред.) *Неделя науки*

инженерно-строительного института – 2025: *Сборник материалов Всероссийской конференции, г. Санкт-Петербург, 1–4 апреля 2025 г. Ч. 2*. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС; 2025. С. 418–420.

Begich Ya.E., Turnaev E.E., Enikeev A.I. Operational properties of plaster facades with a thermal insulation layer of mineral wool and extruded polystyrene foam. In: Belyaev N.D. (ed.) *Science Week of the Civil Engineering Institute – 2025: Collection of materials of the All-Russian Conference, St. Petersburg, April 1–4, 2025. Part 2*. St. Petersburg: POLITYEKN-PREYESS; 2025, pp. 418–420. (In Russ.)

18. Агапитова А.А., Ахмерова Г.М. Особенности выбора и расчета теплоизоляции воздуховодов. *Строительные конструкции, здания и сооружения*. 2022;1(1):22–32.

Agapitova A.A., Akhmerova G.M. Features of selection and calculation of thermal insulation of air ducts. *Construction, Buildings and Structures*. 2022;1(1):22–32. (In Russ.)

19. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. Повышение тепловой устойчивости дорожных одежд в криолитозоне. *Строительные материалы*. 2021;(7):26–31. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-793-7-26-31>

Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F. Increasing the thermal stability of the embankment in Permafrost Regions. *Stroitel'nye materialy*. 2021;(7):26–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-793-7-26-31>

20. Панченко Ю.Ф., Зимакова Г.А., Панченко Д.А. Энергоэффективность использования нового теплозащитного материала для снижения теплопотребления зданий и сооружений. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2011;33(4):97–105.

Panchenko Yu.F., Zimakova G.A., Panchenko D.A. Energy efficiency of the use of the new heat-protective material for reducing the heat consumption of buildings. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2011;33(4):97–105. (In Russ.)

21. Исанова А.В., Кретова Е.Д., Драпалюк Д.А., Драпалюк Н.А. Анализ использования современной теплоизоляции на основе аэрогеля при проектировании энергоэффективных зданий. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2023;44(2):5–11. <https://doi.org/10.52684/2312-3702-2023-44-2-5-11>

Isanova A.V., Kretova E.D., Drapalyuk D.A., Drapalyuk N.A. Analysis of the use of modern thermal insulation based on aerogel in the design of energy-efficient buildings. *Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region*. 2023;44(2):5–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.52684/2312-3702-2023-44-2-5-11>

22. Ярцев В.П., Мамонтов А.А., Мамонтов С.А. Эксплуатационные свойства и долговечность теплоизоляционных материалов (минеральной ваты и пенополистирола). *Кровельные и изоляционные материалы*. 2013;(1):8–11.

Yartsev V.P., Mamontov A.A., Mamontov S.A. Operating properties and durability of heat-insulating materials (mineral wool and expanded polystyrene). *Roofing and Insulation Materials*. 2013;(1):8–11. (In Russ.)

23. Гусев Б.В., Езерский В.А., Монастырёв П.В. Теплопроводность минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий. *Промышленное и гражданское строительство*, 2005;(1):48–49.

Gusev B.V., Yezerzsky V.A., Monastirev P.V. Thermal conductivity of mineral wool slabs under operating conditions. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*, 2005;(1):48–49. (In Russ.)

24. Гусев Б.В., Езерский В.А., Монастырёв П.В. Потеря массы минераловатных плит в условиях эксплуатационных воздействий. *Кровельные и изоляционные материалы*, 2005;(2):48–49.
- Gusev B.V., Yezersky V.A., Monastirev P.V. Weight loss of mineral wool slabs under operating conditions. *Roofing and Insulation Materials*. 2005;(2):48–49. (In Russ.)
25. Рыженков В.А., Прищепов А.Ф., Логинова Н.А., Кондратьев А.П. О влиянии структурированного тонкопленочного теплоизоляционного покрытия на термическое сопротивление теплопроводов. *Энергосбережение и водоподготовка*. 2010;(5):58–59.
- Ryzhenkov V.A., Prishchepov A.F., Loginova N.A., Kondratiev A.P. On the effect of a structured thin-film thermal insulation coating on the thermal resistance of heat pipelines. *Energoberezhenie i vodopodgotovka = Energy Saving and Water Treatment*. 2010;(5):58–59. (In Russ.)
26. Бухмиров В.В., Гаськов А.К. Исследование энергетической эффективности покрытий для утепления зданий. *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2015;69(8):7–11.
- Bukhmirov V.V., Gaskov A.K. Research of energy efficiency of coatings for thermal insulation of buildings. *Cherepovets State University Bulletin*. 2015;69(8):7–11. (In Russ.)
27. Бухмиров В.В., Гаськов А.К. Экспериментальное исследование тонкопленочных энергосберегающих покрытий на основе полых микросфер. В кн.: *Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности: сборник докладов II Международной научно-практической конференции, г. Екатеринбург, 18–21 сентября 2017 г.* Екатеринбург: Изд-во УрФУ; 2018. С. 37–40.
- Bukhmirov V.V., Gaskov A.K. Experimental study of thin-film energy-saving coatings based on hollow microspheres. In: *Modern scientific achievements of metallurgical heat engineering and their implementation in industry: collection of reports of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Yekaterinburg, September 18–21, 2017*. Yekaterinburg: Ural University Press; 2018, pp. 37–40. (In Russ.)
28. Панченко Ю.Ф., Зимакова Г.А., Степанов О.А., Панченко Д.А. Теплоизолирующее покрытие на основе жидкой фольги и полых микросфер. *Строительные материалы*. 2012;(8):83–85.
- Panchenko Yu.F., Zimakova G.A., Stepanov O.A., Panchenko D.A. Heat-insulating coating based on liquid foil and hollow microspheres. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*. 2012;(8):83–85 (In Russ.)
29. Георгияди В.Г., Агапов А.А., Поверенный Ю.С. и др. Применение сверхтонкой теплоизоляции при обустройстве месторождений в районах распространения многолетнемерзлых грунтов. *Нефтяное хозяйство*. 2023;(1):52–57. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-1-52-57>
- Georgiyadi V.G., Agapov A.A., Poverennyu Yu.S., et al. The use of ultrafine thermal insulation in the development of deposits in permafrost distribution. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*. 2023;(1):52–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-1-52-57>
30. Ширинян В.Т. Поход жидко-керамического «супер-теплоизоляционного» покрытия по тепловым сетям России. *Новости теплоснабжения*. 2007;(9):46–51. Режим доступа: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=1953 (дата обращения 14.06.2025)
- Shirinyan V.T. The campaign of liquid ceramic “super thermal insulation” coating on the heating networks of Russia. *Novosti teplosnabzheniya*. 2007;(9):46–51. Available at: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=1953 (accessed: 14.06.2025)
31. Матвиевский А.А., Абызова Т.Ю., Александрия М.Г. Жидкокерамические теплоизоляционные покрытия. Сказка о голом короле. *Стройпрофиль*. 2010;(3):28–30. Режим доступа: <https://stroyprofile.com/archive/3983> (дата обращения 14.06.2025)
- Matviyevsky A.A., Abyzova T.Yu., Alexandria M.G. Liquid ceramic thermal insulation coatings. The tale of the naked King. *Stroyprofil*. 2010;(3):28–30. Available at: <https://stroyprofile.com/archive/3983> (accessed: 14.06.2025)
32. Половников В.Ю. Кондуктивный теплоперенос в слое тонкопленочной тепловой изоляции. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019;330(5):189–197. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/5/279>
- Polovnikov V.Yu. Conductive heat transfer in layer of thin-film thermal insulation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(5):189–197. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/5/279>
33. Эффективность теплоизоляционных красок. Режим доступа: https://fibroblok.ru/info/info/effektivnost_teploizolatsionnyh_krasok#!/back (дата обращения 14.06.2025)
- Efficiency of thermal insulation paints. Available at: https://fibroblok.ru/info/info/effektivnost_teploizolatsionnyh_krasok#!/back (accessed: 14.06.2025)
34. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. Критерий выбора строительных материалов для теплоизоляционных слоев дорожных одежд и оснований. *Успехи современного естествознания*. 2022;(8):108–113. <https://doi.org/10.17513/use.37875>
- Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F. Criterion of choice of building materials for thermal insulation layers of road clothes and bases. *Advances in Current Natural Sciences*. 2022;(8):108–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.17513/use.37875>
35. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. Increasing thermal stability of the roads in cryolithic zone. *Transportation Research Procedia*. 2022;63:412–419. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.029>
36. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. *Теплопроводность смесей и композиционных материалов*. Л.: Энергия; 1974. 264 с.
- Dulnev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Thermal conductivity of mixtures and composite materials*. Leningrad: Energiya Publ.; 1974. 264 p. (In Russ.)
37. Lichteneker K. Zur Widerstands berechnung misch kristall freier Legierungen. *Physikalische Zeitschrift*. Bd.30. 1929;22:805–810.

Об авторах

ГАЛКИН Александр Федорович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5924-876X>, Scopus Author ID: 56559565600, SPIN: 9647-2678, e-mail: afgalkin@mail.ru

ЖЕЛЕЗНЯК Михаил Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, ResearcherID: J-2544-2018, Scopus Author ID: 22959266400, SPIN: 2349-4867, e-mail: fe1956@mail.ru

ЖИРКОВ Александр Федотович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-6721-5338>, ResearcherID: J-1225-2018, Scopus Author ID: 56226280600, SPIN: 3281-5147, e-mail: zhirkov_af@mail.ru

ПАНКОВ Владимир Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4933-0265>, ResearcherID: 4487803; Scopus Author ID: 1325803806, SPIN: 1423-9990, e-mail: pankov1956@inbox.ru

БАЛУТА Виктор Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-4399-0943>, SPIN: 1843-3885, e-mail: vbaluta@keldysh.ru; vbaluta@yandex.ru

Вклад авторов

Галкин А.Ф. – разработка концепции, методология, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, визуализация; **Железняк М.Н.** – редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования; **Жирков А.Ф.** – редактирование рукописи, визуализация, верификация данных; **Панков В.Ю.** – редактирование рукописи, проведение статистического анализа; **Балута В.И.** – проведение исследования, редактирование рукописи, получение финансирования

Конфликт интересов

Один из авторов – доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН Железняк Михаил Николаевич является членом редакционного совета журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

About the authors

GALKIN, Aleksandr Fedorovich, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5924-876X>, Scopus Author ID: 56559565600, SPIN: 9647-2678, e-mail: afgalkin@mail.ru

ZHELEZNYAK, Mikhail Nikolaevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>, ResearcherID: J-2544-2018, Scopus Author ID: 22959266400, SPIN: 2349-4867, e-mail: fe1956@mail.ru

ZHIRKOV, Aleksandr Fedotovitch, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-6721-5338>, ResearcherID: J-1225-2018, Scopus Author ID: 56226280600, SPIN: 3281-5147, e-mail: zhirkov_af@mail.ru

PANKOV, Vladimir Yuryevich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Assistant Professor, <https://orcid.org/0000-0003-4933-0265>, ResearcherID: 4487803, Scopus Author ID: 1325803806, SPIN: 1423-9990, e-mail: pankov1956@inbox.ru

BALUTA, Victor Ivanovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-4399-0943>, SPIN: 1843-3885, e-mail: vbaluta@keldysh.ru; vbaluta@yandex.ru

Authors' contribution

Galkin A.F. – conceptualization, methodology, investigation, data curation, writing – original draft, visualization; **Zheleznyak M.N.** – writing – review & editing, supervision, project administration, funding acquisition; **Zhirkov A.F.** – writing, review & editing, visualization, validation; **Pankov V.Y.** – writing – review & editing, formal analysis; **Baluta V.I.** – investigation, writing – review & editing, funding acquisition

Conflict of interest

One of the authors – Mikhail N. Zheleznyak, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences is a member of the Editorial Board for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 31.07.2025

Поступила после рецензирования / Revised 18.08.2025

Принята к публикации / Accepted 21.08.2025